

# MODIS 위성관측자료를 이용한 한반도 인근지역 대기 에어로졸의 분포특성 (Atmospheric Aerosol over Korea using the MODIS Satellite Observation Data)

이동하, 이권호, 김영준  
(Lee, D. H., K. H. Lee, and Y. J. Kim)

광주과학기술원 환경공학과, 환경 모니터링 신기술 연구센터

## 1. 서론

대기 중의 에어로졸 입자들은 물리·화학적 특성 차이에 의해 태양광을 산란하거나 흡수함으로써 지구 복사 수지, 물 순환, 기후변화에 영향을 미치므로 지구대기연구에 있어 매우 중요한 요소이다(Charlson *et al.*, 1987). 또한 특정 형태의 에어로졸은 구름 입자와 상호작용으로 구름물리적 특성 변화를 통하여 복사특성과 강우과정에 영향을 미친다(Rosenfeld, 2000). 이러한 대기 에어로졸의 복잡한 영향을 이해하기 위해서는 정확한 에어로졸 특성과 분포에 대해서 우선적으로 정량화해야 한다.

현재 미국 NASA에서는 지구관측 시스템 계획(Earth Observing System)의 일부로서 잘 알려진 위성탑재 센서인 MODIS를 이용한 대기의 에어로졸 관측 자료를 생산하고 있다. MODIS 에어로졸 분석 알고리즘은 육지(Kaufman *et al.*, 1997)와 해양(Tanré *et al.*, 1997)에서 각각의 알고리즘으로 에어로졸 광학두께(AOT)를 구한다. MODIS 에어로졸 자료는 전세계 약 200지역 이상의 AEROSOL RObotic NETwork (AERONET Holben *et al.*, 2001)의 Sunphotometer 관측자료를

이용하여 검보정이 되었다. MODIS 에어로졸 관측자료의 정확도는 육상에서  $\pm 0.05 \pm 0.2\tau$ (Chu *et al.*, 2003)과 해상에서  $\pm 0.03 \pm 0.05\tau$ (Remer *et al.*, 2002)로 보고되었으나 한반도 지역에서의 비교결과는 보고된 적이 없다.

한편, 한반도 지역은 지형적 특성으로 중국에서 배출되는 각종 대기오염 물질에 의한 영향을 많이 받고 있다. 중국지역의 대기오염은 잘 알려진 황사뿐만 아니라 이미 Akimoto (2003)와 Richter *et al.*, (2005)의 연구결과와 같이 현재까지 계속 증가하고 있는 상태이므로 장거리 이동성(long-range transport) 오염물질에 대한 감시가 매우 절실하다. 따라서 본 연구에서는 TERRA/MODIS 센서의 에어로졸 관측자료를 이용하여 한반도 인근 지역에서의 2000년부터 2005년까지의 에어로졸의 시·공간적인 특성과 변화 양상을 규명하고자 하였다.

## 2. 자료 및 방법

본 연구에서는 MODIS에 의해 관측된 에어로졸 자료를 분석하기 위하여 MODIS 에어로졸 표준자료인 MOD04\_L2 자료(Version 4.2.4)를 이용하였다. 연구대

상지역은 북위 32°~42°, 동경 115°~133°의 영역으로 중국 동부지역과 한반도 및 동해를 포함하는 동북아시아지역에 해당한다(그림 3). 이 지역에 대한 대기 에어로졸의 공간적 분포 상태를 파악하기 위하여 2000년 2월부터 2005년 12월까지의 6년 동안의 관측 자료를 이용하였다. 그리고 공간해상도의 균일한 격자화를 위하여 한 격자당 0.1°X0.1°(약 10x10km<sup>2</sup> 픽셀)의 해상도를 가지도록 평균화 하였다. 일별 AOT 자료를 월별 AOT 자료로 평균화하였고, 이를 토대로 MAM(3, 4, 5월; 봄), JJA(6, 7, 8월; 여름), SON(9, 10, 11월; 가을), DJF(12, 1, 2월; 겨울)의 4계절 및 연도별 AOT 자료로 생산하여 이용하였다.

### 3. 결과

그림 1은 연구 대상지역에서 6년간의 MODIS AOT를 0.1°x0.1°간격으로 평균한 것으로 지역적 특징으로는 대도시와 공단 지역이 밀집된 중국 지역에 대해 약 0.6이상의 높은 AOT값을 보였으며 이는 한반도 지역(약 0.3)에 비해 2배 가량 높음을 알 수 있다. 특히 서해지역의 AOT는 동해지역에 비해 0.5~0.6정도의 높은 값을 나타내는데, 이는 지형적 특징으로 인한 빠른 풍속에 의해 중국대륙에서 유입되는 에어로졸에 의한 영향으로 간주된다(Myhre *et al.*, 2004).

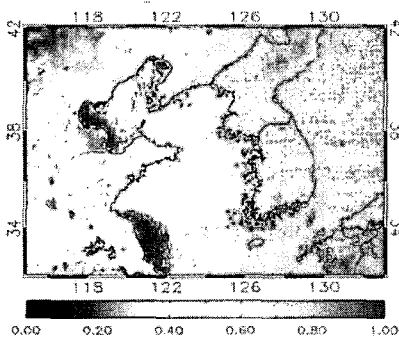


Fig. 1. Average AOT distribution for 6 years during 2000 to 2005 over study area. Each pixel

has 0.1°x0.1° resolution retrieved with latitude of 32°N to 42°N and longitude of 115°E to 133°E.

그림 2는 연구 대상 지역에서 시간 변화에 따른 AOT 변화 추세 특성을 알아보기 위해 각 픽셀에서의 AOT값과 연도에 대한 선형회귀분석을 통하여 각 픽셀별로 6년 동안의 연평균 AOT 변화율을 나타내었다. 그림 2에서 나타나는 지역별 특징은 AOT가 지난 6년 동안 중국 지역에서 매우 높은 상승률(>0.03τ/yr)을 보였으며, 특히 황하강유역을 중심으로 북위 34°~북위 40°지역에서 최고 0.06τ/yr에 해당하는 AOT 증가현상이 나타났다. 이는 급격한 중국의 경제성장의 결과로써 많은 양의 화석연료 연소에 의한 대기 가스상 입자와 에어로졸을 비롯한 오염물질들의 생성에 의한 것으로 여겨진다(Streets *et al.*, 2003). 한반도에서는 휴전선을 경계로 남한지역이 대도시지역을 제외하고는 전체적으로 약 0.01~-0.01정도의 비교적 작은 비율로 증가하거나 감소하는 경향을 보이지만 북한의 경우 매년 0.01정도의 증가 값을 보이고 있다.

한편, AOT자료의 지역별 변화 특징들을 알아보기 위하여 그림 3과 같이 연구대상 지역을 4구획으로 세분화하여 통계분석을 수행하였다. 지역 I은 중국 대도시 지역과 서해 북부지역을 포함하고,

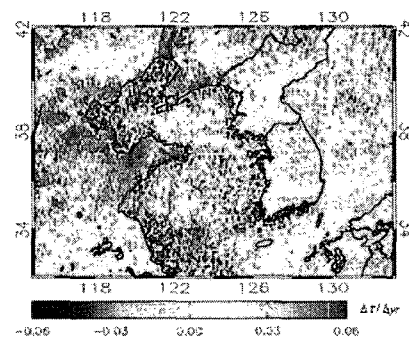


Fig. 2. Average annual AOT change rate at each pixel over the observed area by TERRA/MODIS from 2000 to 2005

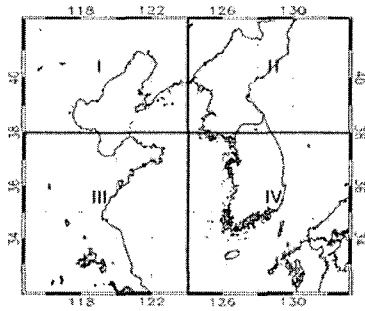


Fig. 3. The four sectors divided by 38°N and 124°E in the study area (32°N ~ 42°N, 115°E ~ 133°E).

지역 II는 한반도에서 북위 38°이북지역과 동해지역, 지역 III은 산둥반도 이남지역과 서해 일부를, 그리고 지역 IV는 북위 38°이남 지역과 남해 및 일본 규슈지역을 포함한다. 그림 4는 이렇게 나누어진 지역별로 월별 AOT 자료에 대한 시계열 분포를 나타내었으며 주로 3~6월의 기간동안 AOT가 증가하는 양상을 보인다. 이는 주로 황사의 영향으로 사료되는데 특히, 2001년과 2002년의 경우 봄철 황사 관측횟수가 서울의 기준으로 각각 24회, 12회로 발생빈도수가 다른 해 보다 많은 것으로 황사의 영향이 컸음을 알 수 있다. 그리고 2003년의 경우 황사 관측횟수는 연 3회로 발생빈도가 현저히 낮았음에도 불구하고 5~7월의 경우 다른 연도보다 더욱 많은 증가양상이 나타나는데 이때는 러시아 지역의 산불에서 발생한 스모크의 영향이 있었던

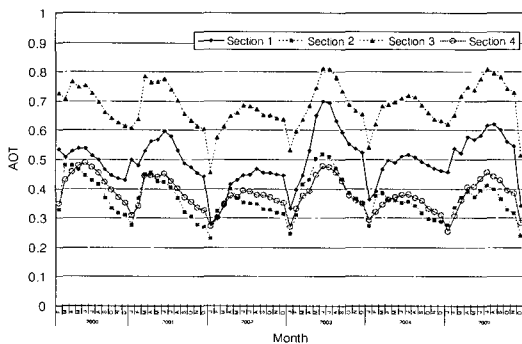


Fig. 4. Time series of monthly averaged AOT at each sector during Feb. 2000~Dec. 2005.

경우(Lee *et al.*, 2005)와 여름철 대기중 2차 생성물의 증가에 의한 영향으로 보인다.

각 지역별 AOT의 연도별 증감 정도를 알아보기 위해 선형 회귀 분석을 하여 그림 5에 나타내었다. 앞서 설명한 내용처럼 중국지역을 포함하고 있는 지역 I과 III에서 연평균 AOT의 값이 각각 0.007과 0.003으로 증가하였고, 지역 II와 IV의 경우 -0.007과 -0.009로 각각 감소하였다. 전체적으로 높은 값을 나타내고 있는 지역 III의 증가율에 비해 지역 I의 증가율이 2배 이상 높았다.

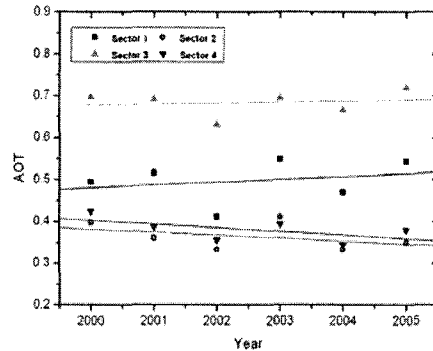


Fig. 5. Linear regression of yearly averaged AOT values at four separated sectors individually.

#### 4. 요약 및 결론

MODIS 위성관측자료를 이용하여 2000년부터 2005년까지 동북아시아의 대기 에어로졸의 시공간적 분포 특성에 관하여 분석하였다. 시간적 분포특성으로는 대기 AOT가 봄과 여름철 높고 가을과 겨울철에 낮은 계절별 특성을 보임을 알 수 있다. 관측 연도별 AOT의 변화율은 지역 I의 경우 다른 지역보다 높은 AOT의 증가율을 보이고 있음을 알 수 있다. 공간적 분포특성으로는 한반도 및 해상의 AOT 값의 감소경향과 중국지역에서의 뚜렷한 증가현상을 볼 수 있다. 또한 황사의 발생빈도가 큰 봄철에 전체적으로 높은 값을 나타냈다. 2003년의 경우는 러시아에 기원

을 둔 산불에 의해 생성된 대기 에어로졸의 장거리 이동 오염에 대한 영향을 받고 있음을 알 수 있었고 그 영향이 컸음을 알 수 있었다.

결론적으로, 인공위성을 이용한 에어로졸 광학 파라미터 자료는 에어로졸의 광학적 특성을 구분하는데 유용하며 특히, 황사 및 바이오매스 연소현상에 의해 생성된 대기 에어로졸 입자들에 관한 광역 분포 정보의 제공과 에어로졸의 시간적 변화양상을 분석함으로써 대기 오염원으로서의 에어로졸 변화추이를 파악 할 수 있었다.

## 사 사

본 연구는 광주과학기술원 환경 모니터링 신기술연구센터(ADEMRC)를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다. MODIS 자료를 제공한 미국 항공 우주 개발국 (NASA)에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- Akimoto, H., 2003: Global Air Quality and Pollution, *Science*, 302(Dec 5), 1716-1719.
- Charlson, R.J., J.E. Lovelock, M.O. Andreae, and S.G. Warren, 1987: Oceanic phytoplankton, atmospheric sulfur, cloud albedo and climate, *Nature*, 326, 655-661.
- Chu, D.A., Kaufman, Y.J., Zibordi, G., Chern, J.D., Mao, J., Li, C., and Holben, B.N., 2003: Global monitoring of air pollution over land from the Earth Observing System-Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), *J. Geophys. Res.*, 108, 4661, 2002JD003179.
- Holben, B.N., Tanré, D., Smirnov, A., Eck, T.F., Slutsker, I., Abuhassan, N., Newcomb, W.W., Schafer, J.S., Chatenet, B., Lavenu, F., Kaufman, Y.J., V. Castle, J., Setzer, A., Markham, B., Clark, D., Frouin, R., Halthore, R., Karnieli, A., O'Neill, N.T., Pietras, C., Pinker, R.T., Voss, K., Zibordi, G., 2001: An emerging ground-based aerosol climatology: aerosol optical depth from AERONET, *J. Geophys. Res.*, 106, 1206712097.
- Kaufman, Y.J., Wald, A.E., Remer, L.A., Gao, B.-C. Li, R.-R., Flynn, L., 1997: The MODIS 2.1- $\mu\text{m}$  channel correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol, *Geosci. Rem. Sens.*, 35, 1286-1298.
- Lee, K.H., J.E. Kim, Y.J. Kim, J. Kim, W. von Hoyningen-Huene, 2005: Impact of the smoke aerosol from Russian forest fires on the atmospheric environment over Korea during May 2003, *Atmospheric Environment*, 39, 8599.
- Myhre G., F. Stordal, M. Johnsrud, D.J. Diner, I.V. Geogdzhayev, J.M. Haywood, B. Holben, T. Holzer-Popp, A. Ignatov, R. Kahn, Y.J. Kaufman, N. Loeb, J. Martonchik, M.I. Mishchenko, N.R. Nalli, L.A. Remer, M. Schroedter-Homscheidt, D. Tanré, O. Torres, and M. Wang, 2004: Intercomparison of satellite retrieved aerosol optical depth over ocean during the period September 1997 to December, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 4, 82018244.
- Remer, L.A., Tanré, D., Kaufman, Y.J., Ichoku, C., Mattoo, S., Levy, R., Chu, D.A., Holben, B.N., Dubovik, O., Ahmad, Z., Smirnov, A., Martins, J.V., Li, R.-R., 2002: Validation of MODIS aerosol retrieval over ocean, *Geophys. Res. Lett.*, 29, 2001GL013204.
- Richter, A., J.P. Burrows, H. Nuß, C. Granier, and U. Niemeier, 2005: Increase in tropospheric nitrogen dioxide over China observed from space, *Nature*, 437, nature04092, 129-132.
- Rosenfeld D., 2000: Suppression of Rain and Snow by Urban and Industrial Air Pollution, *Science*, 287, 1793-1796.
- Streets, D.G., T.C. Bond, G.R. Carmichael, S.D. Fernandes, Q. Fu, D. He, Z. Klimont, S.M. Nelson, N.Y. Tsai, M.Q. Wang, J.-H. Woo, and K.F. Yarber, 2003: An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000, *J. Geophys. Res.*, 108(D21), 8809, doi:10.1029/2002JD003093.
- Tanré, D., Kaufman, Y.J., Herman, M., & Mattoo, S., 1997: Remote sensing of aerosol properties over oceans using the MODIS/EOS spectral radiances. *J. Geophys. Res.*, 102(D14): 16971-16988.